

Разработка принципиальной схемы многopotочного эжектора, оснащенного звеньями переменной длины

Ю.А. Сазонов, В.В. Воронова, Н.А. Ерёмин✉, Х.А. Туманян

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация
✉ gasseparator@mail.ru

Резюме: Изучены особенности многopotочного эжектора, оснащенного звеньями переменной длины для управления вектором тяги. Впервые с общих позиций рассмотрены условия, когда угол отклонения вектора тяги может меняться в диапазоне от плюс 180 град до минус 180 град в любом направлении в пределах полной геометрической сферы. В рамках концептуального проектирования с использованием CFD-технологий рассматриваются кинематические схемы со звеньями переменной длины и с гибкими звеньями. Показаны технические возможности для контролируемого распределения энергии по разнонаправленным каналам эжектора при сохранении постоянства давления на входе в сопловой аппарат. Рассмотрены варианты модернизации сопла Лавала с поворотным диффузором. Результаты исследований патентуются и ориентированы на использование в учебном процессе при подготовке конструкторов с опорой на философию науки и техники и с опорой на методологию Эйлера в рамках работ междисциплинарного характера. Результаты проведенных работ главным образом используются для развития научных исследований и опытно-конструкторских работ при создании энергоэффективных технологий добычи нефти и газа.

Ключевые слова: многopotочный эжектор, вектор тяги, звено переменной длины, CFD-технологии, струйный насос, добыча нефти, добыча газа

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания в области научной деятельности, тема FSZE-2023-0004.

Для цитирования: Сазонов Ю.А., Воронова В.В., Ерёмин Н.А., Туманян Х.А. Разработка принципиальной схемы многopotочного эжектора, оснащенного звеньями переменной длины. *Горная промышленность*. 2024;(5S):145–150. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-145-150>

Development of a schematic diagram for a multiflow ejector equipped with the links of variable length

Yu.A. Sazonov, V.V. Voronova, N.A. Eremin✉, K.A. Tumanyan

National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation
✉ gasseparator@mail.ru

Abstract: The study focuses on the specific features of a multiflow ejector equipped with variable-length links to control the thrust vector. Conditions when the deflection angle of the thrust vector can vary within the range from plus 180 degrees to minus 180 degrees, in any direction within a complete geometrical sphere, are considered for the first time ever from a general point of view. Kinematic schemes with variable length links and with flexible links are considered using the CFD techniques within the framework of conceptual designing. Technical possibilities are shown for controlled distribution of the energy through differently orientated ejector channels, while maintaining constant pressure at the inlet to the nozzle assembly. Options are considered for modification of the Laval nozzle with a rotary diffuser. The research results are patented and are intended to be used in the educational process for designers' training, backed by the philosophy of science and technology, and with the reference to the Euler methodology within the framework of interdisciplinary works. The results of the performed studies are mainly used to promote scientific research and development activities in creation of energy-efficient oil and gas production technologies.

Keywords: multiflow ejector, thrust vector, variable length link, CFD technology, jet pump, oil production, gas production

Acknowledgments: The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state assignment for scientific activity, topic No. FSZE-2023-0004.

For citation: Sazonov Yu.A., Voronova V.V., Eremin N.A., Tumanyan K.A. Development of a schematic diagram for a multiflow ejector equipped with the links of variable length. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):145–150. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-145-150>

Введение

В Эжекторы и струйные насосы из-за их простой конструкции, высокой надежности и экономической эффективности широко применяются во многих отраслях производства, включая энергетические технологии [1–3], область добычи нефти и газа [4; 5]. Развитие мировой энергетики сейчас тесно связано с использованием водорода. Для улучшения водородных технологий активно применяют эжекторы различных типов [6; 7]. Подача рабочей среды в сопло эжектора может осуществляться в импульсном режиме [8]. Электронное управление эжектором может осуществляться при использовании подвижной иглы, размещенной в сопловом аппарате [9].

В двигателях и в энергетических технологиях при использовании высокотемпературных сред применяют кольцевые сопловые эжекторы [10].

Исследуются возможности расширения области применения эжекторов за счет использования криволинейных камер смещения [11]. При разработке эжекторов с криволинейной камерой смещения следует учитывать результаты исследований S-образных каналов [12–14]. Также ставятся вопросы по оптимизации геометрии U-образных каналов [15].

Целью данной статьи является изучение многопоточного эжектора, оснащенного звеньями переменной длины для управления вектором тяги, когда угол отклонения вектора тяги может меняться в диапазоне от плюс 180° до минус 180° в любом направлении в пределах полной геометрической сферы, с перспективой создания интеллектуальных струйных систем управления, отличающихся своим быстродействием, простотой и универсальностью.

Методология

Применяемая методология исследований ориентирована на дальнейшее развитие методологии Эйлера [16–19]. Подготовлена соответствующая блок-схема, показанная на рис. 1.

В соответствии с блок-схемой выполняется разработка гипотез о развитии многопоточных эжекторов. Выдвинута гипотеза о возможности создания универсальной и простой системы управления многопоточным эжектором при согласованном распределении энергии в выходных каналах (как при равномерном, так и при неравномерном распределении этой энергии). На данном этапе исследований рассматриваются варианты кинематических схем, содержащих в своем составе звенья переменной длины для управления вектором тяги. В рамках концептуального проектирования ведется разработка множества принципиальных схем в области многопоточных эжекторов.

Результаты проведенных работ используются для развития научных исследований и опытно-конструкторских работ при создании энергоэффективных технологий добычи нефти и газа.

Результаты

При подготовке научного задела [16–19] авторами данной статьи были показаны технические возможности для управления вектором тяги в пределах полной геометрической сферы, когда угол отклонения вектора тяги может меняться в диапазоне от плюс 180° до минус 180° в любом направлении. В качестве рабочей среды (рабочего тела) для изучаемых струйных систем могут выступать газ, жидкость или газожидкостная смесь. Рассмотрим пример

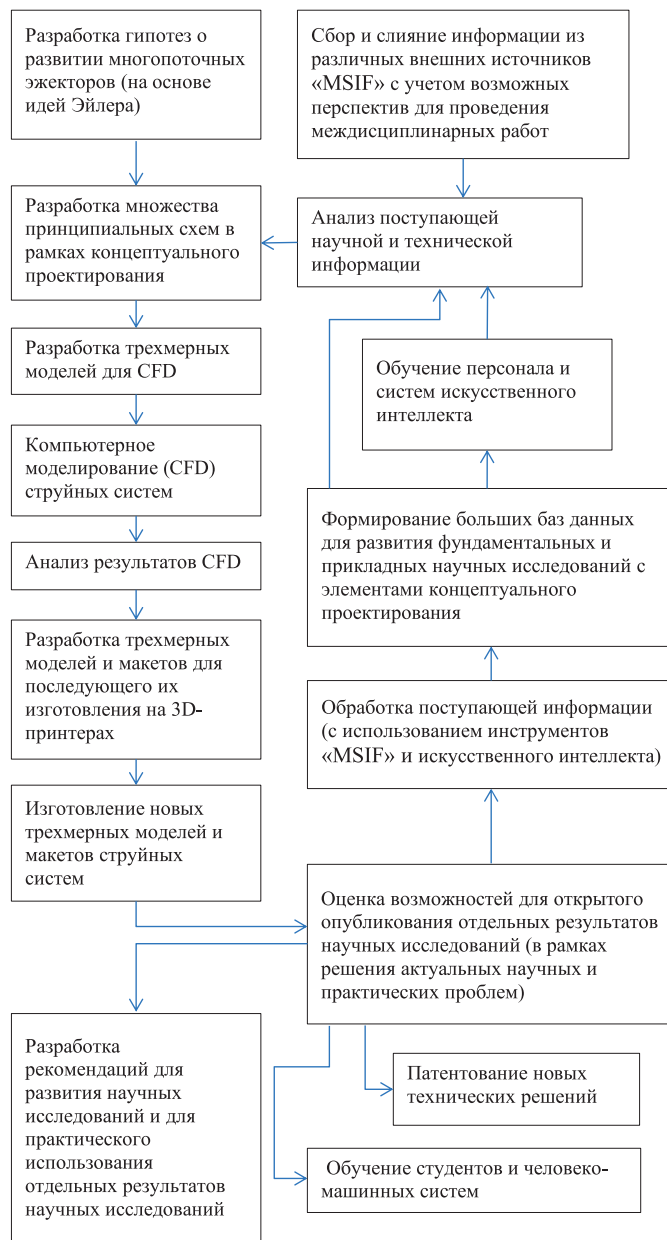


Рис. 1
Блок-схема методологии научных исследований

Fig. 1
A block diagram of the research methodology

деления основного потока Q на четыре части с массовыми расходами (Q_a, Q_b, Q_{a2}, Q_{b2}) при неизменном давлении на входе основного потока:

$$\left\{ \begin{aligned} Q &= Q_a + Q_b + Q_{a2} + Q_{b2} = idem \\ 0 &\leq Q_a \leq Q \\ 0 &\leq Q_b \leq Q \\ 0 &\leq Q_{a2} \leq Q \\ 0 &\leq Q_{b2} \leq Q \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Распределение массового расхода по четырем каналам может быть равномерным или неравномерным. Схема подобной струйной системы с четырьмя выходными каналами представлена на рис. 2.

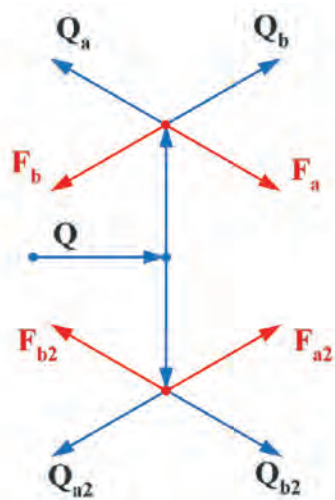


Рис. 2
Схема струйной системы с четырьмя выходными каналами

Fig. 2.
A schematic diagram of the jet system with four outlet channels

Четыре потока с массовыми расходами (Q_a, Q_b, Q_{a2}, Q_{b2}) провоцируют возникновение четырех реактивных сил соответственно (F_a, F_b, F_{a2}, F_{b2}). В представленном примере выделим пару потоков (Q_a, Q_b), как показано на рис. 3.

Сопловой аппарат имеет один входной канал 5 и два выходных канала с квадратными критическими сечениями 6a, 6b со стороны квадрата S. Для регулировки площади канала в критическом сечении используются клинообразные наконечники 7a, 7b. При этом сопловой аппарат оснащен штоками 8a, 8b с квадратными поперечными сечениями. В этом случае суммарная площадь канала в критическом сечении f_a :

$$f_a = S^2 - S * S_{7a} = S^2 * \frac{x_a}{L}, \quad (2)$$

где x_a – смещение (координата) клинообразного наконечника по оси X_a ; L – длина клинообразного наконечника.

Смещение клинообразного наконечника 7a и 7b может осуществляться с помощью гидропривода (на рисунке схематично показан цилиндр 11 и поршень 12).

Источники рабочей среды могут одновременно подавать рабочую среду во входной канал 5. Возможен и другой режим работы – последовательное во времени подключение источника 10a, а затем источника 10b. С помощью запорных устройств 9a, 9b обеспечивается тот или иной режим работы источников рабочей среды.

В данном примере один из выходных каналов оснащен криволинейным патрубком 2a, который позволяет осуществлять поворот диффузора 1a на угол ψ вокруг оси 14. Кроме того, в этом примере, в частном случае, криволинейный патрубок 2a обеспечивает поворот потока на угол ($\beta = 90^\circ$). Но в общем случае можно принять следующее условие: ($0 \leq \beta \leq 180^\circ$). В ходе численных экспериментов необходимо будет оценить потери тяги экспериментального сопла Лавала для условия, когда угол ($\beta = 90^\circ$). Обычно же на практике используют классическое сопло Лавала при условии ($\beta = 0^\circ$).

На рис. 4 схематично показан вариант соплового аппарата с механическим приводом для управления движением клинообразных наконечников 7a, 7b. В кинематическую схему такого устройства включены звенья переменной

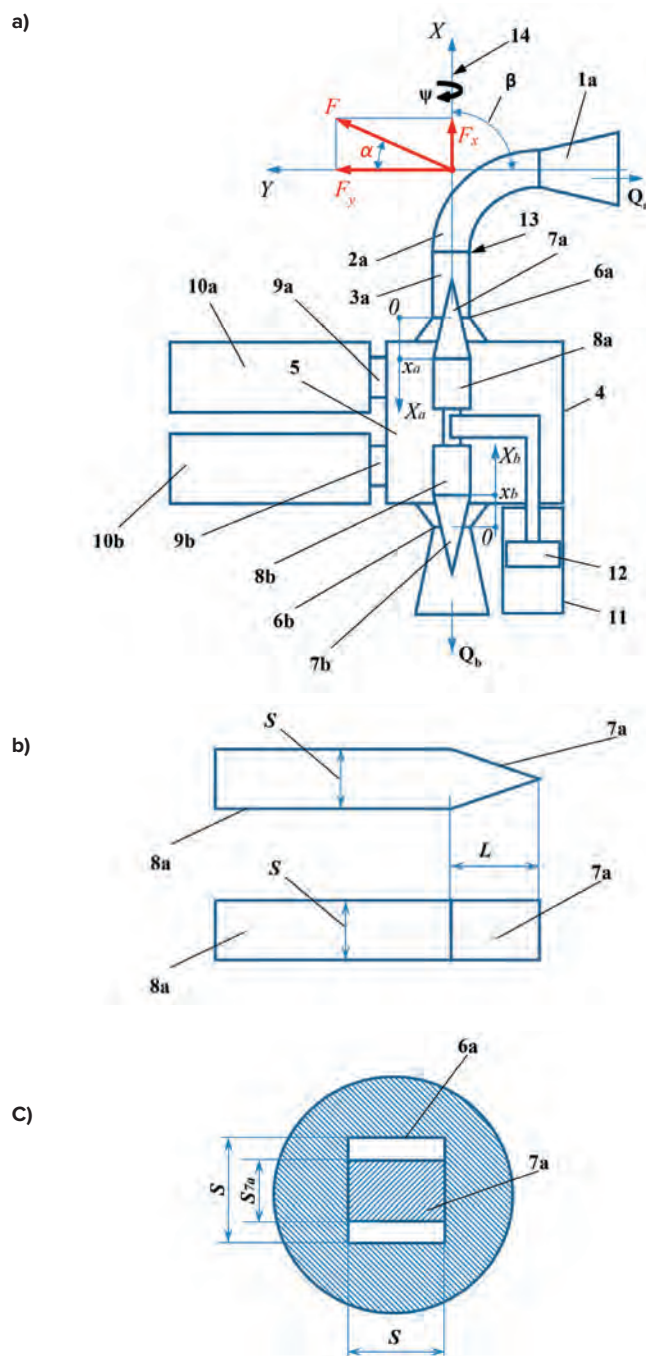


Рис. 3
Схема соплового аппарата с двумя выходными каналами: 1a – диффузор; 2a – криволинейный патрубок; 3a – переходный патрубок; 4 – корпус; 5 – входной канал; 6a, 6b – критические сечения; 7a, 7b – клинообразные наконечники; 8a, 8b – штоки с квадратными поперечными сечениями; 9a, 9b – запорные устройства; 10a, 10b – источники рабочей среды; 11 – цилиндр гидравлического привода; 12 – поршень гидравлического привода; 13 – плоскость контакта между патрубками; 14 – ось вращения

Fig. 3
A schematic of a nozzle assembly with two outlet channels: 1a – a diffuser; 2a – a curved pipe; 3a – a transition pipe; 4 – housing; 5 – an inlet channel; 6a, 6b – critical sections; 7a, 7b – wedge-shaped tips; 8a, 8b – rods with square cross-sections; 9a, 9b – shut-off devices; 10a, 10b – sources of the working medium; 11 – the hydraulic drive cylinder; 12 – the hydraulic drive piston; 13 – the contact plane between the nozzles; 14 – the rotation axis

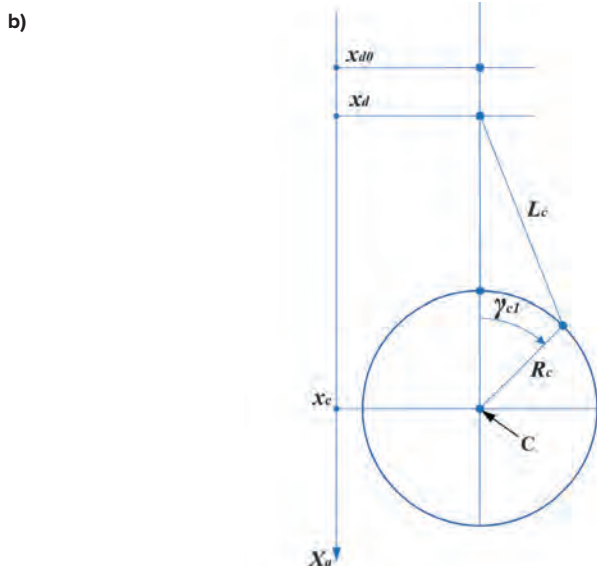
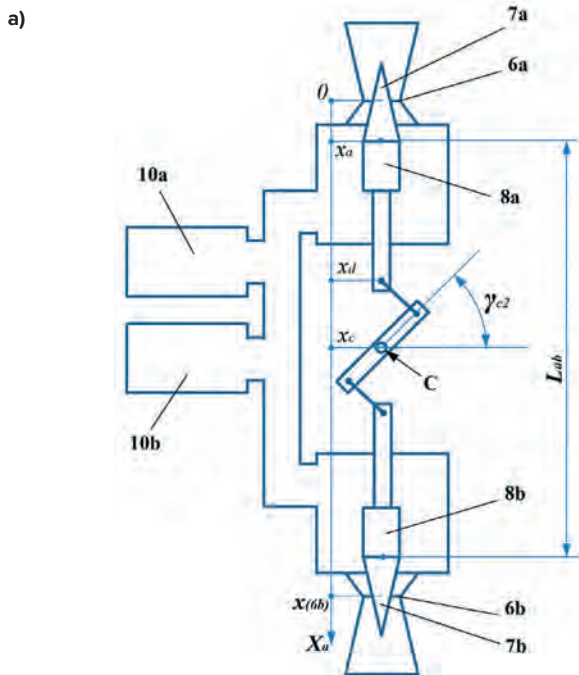


Рис. 4
 Схема регулируемого эжектора, оснащенного механическим приводом ($L_{ab} = var$):
 6a, 6b – критическое сечение;
 7a, 7b – клинообразные наконечники;
 8a, 8b – штоки с квадратными поперечными сечениями;
 10a, 10b – источники рабочей среды

Fig. 4
 A schematic diagram of an adjustable ejector equipped with a mechanical drive ($L_{ab} = var$):
 6a, 6b – the critical cross-section;
 7a, 7b – wedge-shaped tips;
 8a, 8b – rods with square cross-sections;
 10a, 10b – sources of the working medium

длины, когда обеспечивается возможность изменять расстояние между клинообразными наконечниками 7a, 7b, соответственно изменяется и значение линейного параметра L_{ab} . Одно из запатентованных технических решений также представлено в патенте авторов данной статьи (патент РФ на изобретение №2819487), где в кинематической схеме используются звенья переменной длины.

В представленном примере принято условие ($\gamma_{c1} + \gamma_{c2} = 90^\circ$).

Поворот кривошипа радиусом R_c на угол γ_{c1} обеспечивает изменение параметра L_{ab} за счет изменения суммы проекций звена R_c и звена L_c на ось X_a .

$$x_c - x_d = R_c * \cos \gamma_{c1} + \sqrt{L_c^2 - (R_c * \sin \gamma_{c1})^2} = var, \quad (3)$$

где $(x_c - x_d)$ – сумма проекций звена R_c и звена L_c на ось X_a .
 Для угла ($\gamma_{c1} = 0$) соответственно сумма проекций звена R_c и звена L_c на ось X_a будет наибольшей:

$$x_c - x_d = x_c - x_{d0} = R_c + L_c, \quad (4)$$

Смещение клинообразных наконечников 7a и 7b может осуществляться с помощью механического привода за счет смещения центра «С» кривошипа радиусом R_c при сохранении (при фиксации) выбранного значения γ_{c1} (при этом будет меняться и координата x_c по оси X_a). Расстояние между критическими сечениями 6a, 6b принимается неизменным и равным $x_{(6b)}$.

Для примера по рис. 2 и 3, когда угол ($\beta = 90^\circ$), составлены следующие соотношения:

$$\begin{cases} F_a = F_y \\ F_b = F_x \\ F = \sqrt{F_a^2 + F_b^2} \\ \tan \alpha = \frac{F_b}{F_a} \\ 0 \leq \psi \leq \pi \end{cases} \quad (5)$$

Для варианта, когда ($L_{ab} = x_{(6b)} - L$), при равенстве соответствующих геометрических размеров деталей (7a, 7b) будут верны следующие соотношения:

$$\begin{cases} \frac{x_a}{L} + \frac{x_b}{L} = 1 \\ \frac{f_a}{S^2} + \frac{f_b}{S^2} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

Для совместной работы могут быть использованы два сопловых аппарата, каждый из которых выполнен по схеме из рис. 4. На рис. 5 показан такой пример соплового аппарата с четырьмя выходными каналами. В такой системе формируются уже четыре потока с массовыми расходами (Q_a, Q_b, Q_{a2}, Q_{b2}), провоцируют возникновение четырех реактивных сил соответственно (F_a, F_b, F_{a2}, F_{b2}), как это было показано на рис. 2.

Управление дополнительными выходными каналами (b_{a2}, b_{b2}) может быть связано с движением общего центра «С», как показано на рис. 5. Но не исключаются варианты, когда потоки в основных каналах (b_a, b_b) и потоки в дополнительных каналах (b_{a2}, b_{b2}) будут контролироваться с помощью двух отдельных систем управления.

Различные варианты сопловых аппаратов и многопоточных эжекторов с использованием схем на рис. 3–5 могут быть использованы при разработке летательных аппаратов с вертикальным взлетом и посадкой. Использование звеньев переменной длины обеспечивает возможности для быстрого и полного перекрытия определенной группы каналов и для выполнения уникальных и сложных маневров, которые в перспективе уже не будут доступны отдельному человеку (в силу его ограниченных физиологических спо-

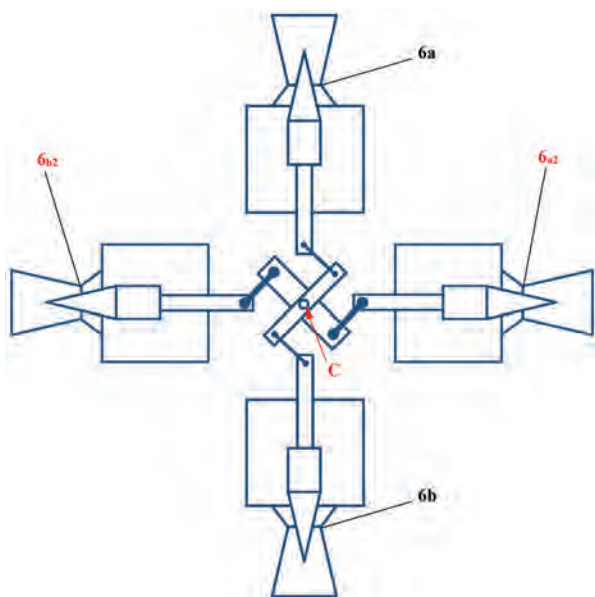


Рис. 5
 Схема соплового аппарата с четырьмя выходными каналами:
6a, 6b – основные выходные каналы;
6a2, 6b2 – дополнительные выходные каналы

Fig. 5
 A schematic of a nozzle assembly with four outlet channels:
6a, 6b – the main outlet channels;
6a2, 6b2 – additional outlet channels

собностей), но которые будут доступны только искусственному интеллекту.

При использовании звеньев переменной длины подобные струйные системы позволяют распределять энергию рабочей среды по сети разнонаправленных выходных каналов соплового аппарата, расширяя технические воз-

можности для управления вектором тяги в пределах полной геометрической сферы в дополнение к описанным ранее технологиям [16–19].

Если рассматривать область энергетики, к примеру, добычу нефти и газа, то в качестве источников рабочей среды (*10a, 10b* – см. рис. 3 и 4) могут выступать добывающие скважины с высоким пластовым давлением. Многопоточный эжектор в этом случае позволит рационально использовать природную пластовую энергию для поддержания уровня добычи нефти и газа из скважин с пониженным пластовым давлением. Рассматриваются и варианты использования пластовой энергии для генерации электроэнергии на морских нефтяных и газовых месторождениях.

Заключение

Исследованы особенности рабочего процесса многопоточного эжектора, оснащенного регулируемым многопоточным сопловым аппаратом, с использованием звеньев переменной длины. Разработаны новые научные принципы для проектирования многопоточного эжектора при контролируемом распределении энергии по каналам эжектора. Новые технические решения запатентованы.

Разработаны базовые математические модели для проектирования многопоточных эжекторов, позволяющих управлять вектором тяги для условий, когда угол отклонения вектора тяги может меняться в диапазоне от плюс 180 град до минус 180 град в любом направлении в пределах полной геометрической сферы.

Предложены практические рекомендации и новые технические возможности для экстремального управления вектором тяги в пределах полной геометрической сферы при контролируемом распределении энергии по каналам многопоточного эжектора. Результаты выполненных научных исследований могут быть использованы в энергетике, в том числе при добыче нефти и газа.

Список литературы / References

1. Gruber S., Rola K., Urbancl D., Goričanec D. Recent Advances in Ejector-Enhanced Vapor Compression Heat Pump and Refrigeration Systems – A Review. *Energies*. 2024;17(16):4043. <https://doi.org/10.3390/en17164043>
2. Jin M., Zhang X., Zhou J., Zhang L. Performance Analysis of an Ejector-Enhanced Heat Pump System for Low-Temperature Waste Heat Recovery Using UHVDC Converter Valves. *Energies*. 2024;17(14):3589. <https://doi.org/10.3390/en17143589>
3. Xu D., Gu Y., Li W., Chen J. Experimental Investigation of the Performance of a Novel Ejector–Diffuser System with Different Supersonic Nozzle Arrays. *Fluids*. 2024;9(7):155. <https://doi.org/10.3390/fluids9070155>
4. Aboozar H., Pejman K., Jose A.V., Daniel V.D.J. Systems and methods for gas pulse jet pump. United States Patent 10837463. Publication Date: 11/17/2020. Available at: <https://www.freepatentsonline.com/10837463.pdf> (accessed: 28.09.2024).
5. Knoeller M.C., Robison C.E., Agarwal M., Paulet B.A. Jet pump controller with downhole prediction. United States Patent 11078766. Publication Date: 08/03/2021. Available at: <https://www.freepatentsonline.com/11078766.pdf> (accessed: 28.09.2024).
6. Xu Z., Liu B., Tong Y., Dong Z., Feng Y. Modeling and Control of Ejector-Based Hydrogen Circulation System for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems. *Energies*. 2024;17(11):2460. <https://doi.org/10.3390/en17112460>
7. Li J., Wu T., Cheng C., Li J., Zhou K. A Review of the Research Progress and Application of Key Components in the Hydrogen Fuel Cell System. *Processes*. 2024;12(2):249. <https://doi.org/10.3390/pr12020249>
8. Li C., Sun B., Bao L. Coupling Global Parameters and Local Flow Optimization of a Pulsed Ejector for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Sustainability*. 2024;16(1):4170. <https://doi.org/10.3390/su16104170>
9. Brunner D.A., Marcks S., Bajpai M., Prasad A.K., Advani S.G. Design and characterization of an electronically controlled variable flow rate ejector for fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(5):4457–4466. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.116>

10. Lysak I.A., Lysak G.V., Konyukhov V.Yu., Stupina A.A., Gozbenko V.E., Yamshchikov A.S. Efficiency Optimization of an Annular-Nozzle Air Ejector under the Influence of Structural and Operating Parameters. *Mathematics*. 2023;11(14):3039. <https://doi.org/10.3390/math11143039>
11. Völker M., Sausner A. Suction jet pump. United States Patent 10072674. Available at: <https://www.freepatentsonline.com/10072674.pdf> (accessed: 28.09.2024).
12. Wang C., Lu H., Kong X., Wang S., Ren D., Huang T. Effects of Pulsed Jet Intensities on the Performance of the S-Duct. *Aerospace*. 2023;10(2):184. <https://doi.org/10.3390/aerospace10020184>
13. Ahmed F., Eames I., Moeendarbary E., Azarbadegan A. High-Strouhal-number pulsatile flow in a curved pipe. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021;923:A15. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.553>
14. Brethouwer G. Turbulent flow in curved channels. *Journal of Fluid Mechanics*. 2022;931:A21. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.953>
15. Jesudasan R., Müller J.-D. High-Resolution CAD-Based Shape Parametrisation of a U-Bend Channel. *Aerospace*. 2024;11(8):663. <https://doi.org/10.3390/aerospace11080663>
16. Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Gryaznova I.V., Voronova V.V., Tumanyan K.A., Konyushkov E.I. Thrust Vector Control within a Geometric Sphere, and the Use of Euler's Tips to Create Jet Technology. *Civil Engineering Journal*. 2023;9(10):2516–2534. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-10-011>
17. Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Gryaznova I.V., Voronova V.V., Tumanyan K.A., Konyushkov E.I. Solving Innovative Problems of Thrust Vector Control Based on Euler's Scientific Legacy. *Civil Engineering Journal*. 2023;9(11):2868-2895. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-11-017>
18. Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Gryaznova I.V., Voronova V.V., Tumanyan K.A., Konyushkov E.I. Methods for regulating ejector systems within interdisciplinary research using computer modeling. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*. 2023;15(4):306–320. Available at: <https://www.ijtp.com/IJTPE/IJTPE-2023/IJTPE-Issue57-Vol15-No4-Dec2023/39-IJTPE-Issue57-Vol15-No4-Dec2023-pp306-320.pdf> (accessed: 28.09.2024).
19. Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Bondarenko A.V., Voronova V.V., Tumanyan K.A., Konyushkov E.I. Interdisciplinary Studies of Jet Systems using Euler Methodology and Computational Fluid Dynamics Technologies. *HighTech and Innovation Journal*. 2023;4(4):703–719. <https://doi.org/10.28991/HIJ-2023-04-04-01>

Информация об авторах

Сазонов Юрий Апполоньевич – доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: ysaz60@mail.ru

Воронова Виктория Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: voronova.vv@gubkin.ru

Еремин Николай Александрович – академик РАН, доктор технических наук, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: ermn@mail.ru

Туманян Хорен Артурович – младший научный сотрудник Института физики горных пород месторождений, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: horen.tumanyan@mail.ru

Information about the authors

Yuri A. Sazonov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Machinery and Equipment for Oil and Gas Industry, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; e-mail: ysaz60@mail.ru

Victoria V. Voronova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Gas and Gas Condensate Field Development and Operation, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; e-mail: voronova.vv@gubkin.ru

Nikolay A. Eremín – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Dr. Sci. (Eng.), National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; e-mail: ermn@mail.ru

Khoren A. Tumanyan – Junior Research Associate, Institute of Reservoir Rock Physics, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; e-mail: horen.tumanyan@mail.ru

Article info

Received: 03.09.2024

Revised: 17.10.2024

Accepted: 18.10.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.09.2024

Поступила после рецензирования: 17.10.2024

Принята к публикации: 18.10.2024